

Comité de Ciencia, Tecnología, Academia e Innovación de la  
Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Campus  
Palenque del Instituto Politécnico Nacional (CITAI UPIIP - IPN)



## PROPUESTA

No. 008

Plan de Trabajo del Comité CITAI UPIIP – IPN

Título del proyecto estratégico:

Ventilación, calidad de aire, confort térmico y  
eficiencia de consumo de combustible en trenes del  
sistema ferroviario mexicano

## 1. Descripción de la propuesta:

El sistema ferroviario mexicano (SFM) en el sector de pasajeros está en proceso de recuperación, mediante la construcción del Tren Maya [1]. En cuanto al sector de carga se está ampliando y actualizando, con obras de construcción importantes en el Ferrocarril del Istmo de Tehuantepec [2]. En el siguiente sexenio que empezará en octubre del 2024, el SFM entrará en una etapa de consolidación enfocándose en el sector de pasajeros con base en la iniciativa de proyecto de decreto del Servicio Ferroviario de Pasajeros en el que se reforma y adiciona el artículo 28 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos [3]. En esta reforma se propone que el estado retome el derecho de utilizar las vías férreas para el servicio de transporte de pasajeros. De las 17 líneas más importantes se empezaría por consolidar a 8. Para cada una de las líneas existentes y las que están en construcción se cuentan con diferentes modelos de trenes que trabajarán en diversas condiciones climáticas. Por todo lo anterior, se requieren estudios que permitan conocer el tipo de ventilación (natural o mecánica) recomendada en las diferentes cabinas de pasajeros y cabinas de conducción, para mantener niveles adecuados de calidad de aire y confort térmico, además del efecto en el consumo de combustible.

[1] FONATUR (2023). Informe de Avance y Resultados 2022 del Programa Institucional 2020-2024 de FONATUR Tren Maya, S.A. de C.V., Gobierno de México, página visitada el 16-jun-2024: <https://www.gob.mx/ftm/documentos/informe-de-avance-y-resultados-2022-del-programa-institucional-2020-2024-de-fonatur-tren-maya-s-a-de-c-v>.

[2] Gobierno de México (2024). Corredor Interoceánico: Istmo de Tehuantepec, Interoceánico Ferrocarril del Istmo de Tehuantepec, página visitada el 16-jun-2024: <https://www.ferroistmo.com.mx>.

[3] Secretaría de Gobernación (2024). Iniciativa con Proyecto de Decreto por el que se reforma y adiciona el artículo 28 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, Sistema de Información Legislativa, Gobierno de México, página visitada el 16-jun-2024: <http://sil.gobernacion.gob.mx/portal>.

## 2. Resumen descriptivo del proyecto:

Se plantea desarrollar un estudio experimental y numérico que permita obtener resultados que puedan sustentar manuales, reglas de operación, normas y reglamentos de diseño y construcción de sistemas de ventilación. Estos resultados garantizarán en el SFM el mejoramiento de niveles adecuados de calidad de aire (bajos niveles de partículas contaminantes e infecciosas), de temperatura y humedad con fines de confort térmico, para usuarios y trabajadores. Además, la implementación de estas reglas de operación disminuirá el consumo de combustible, efecto que también sería explorado en este estudio. Por lo tanto, pondría al SFM a la vanguardia en el campo de la sustentabilidad y servicio de trenes.

## 3. Alcance o impacto esperado:

Con el desarrollo de este proyecto se obtendrán los resultados teóricos, experimentales y numéricos que den fundamento a reglas de operación en cabinas de conducción y de pasajeros en el SFM de:

- a) Condiciones de calidad del aire en términos de gases nocivos y partículas infecciosas para la salud de los ocupantes (trabajadores y pasajeros).
- b) Niveles de temperatura y humedad para cada región del país (características climáticas y usos y costumbres) y tipo de tren.
- c) Estrategias y mecanismos que garanticen una distribución uniforme del aire al interior de los trenes cerrados con el menor efecto de consumo de combustible.
- d) Estrategias que utilicen ventilación mixta (ventanas y sistemas mecánicos) en trenes con ventanas abatibles que tengan el menor efecto de consumo de combustible.
- e) Eficiencia en el consumo de combustible.

#### 4. Antecedentes de la propuesta:

En el SFM no se cuenta con estudios que permitan conocer las estrategias de ventilación en cabinas de conducción y de pasajeros que garanticen niveles adecuados de calidad de aire (bajos niveles de partículas contaminantes e infecciosas), de temperatura y humedad con fines de confort térmico. Tampoco se cuentan con estudios que vinculen los requerimientos de calidad de aire-confort con el consumo de combustible, es decir, de la eficiencia en el consumo de combustible para fines de calidad de aire y confort térmico.

En la nueva normalidad, después de la pandemia COVID-19, se han realizado estudios que muestran los tres mecanismos de transmisión del virus SARS-CoV-2 [4]: contacto con superficies infectadas, gotículas de saliva de corta duración y gotículas de saliva suspendidas de larga duración [5]. El riesgo de contraer la enfermedad del COVID-19 por los dos primeros mecanismos puede disminuirse mediante la limpieza de superficies y la sana distancia (mayor a 1.5 m). Sin embargo, el tercer mecanismo representa el mayor riesgo [6], sobre todo en zonas cerradas sin la renovación del aire interior por aire exterior más limpio o sin el lavado y filtrado del aire por sistemas altamente especializados. En lugares donde es posible el uso de ventanas, el aumento de la velocidad del aire entrante ayuda a la disminución en la concentración de aerosoles con partículas contaminantes o infecciosas [7]. Cuando el único medio disponible para ventilar el interior es por medio de sistemas mecánicos, se recomienda utilizar equipos con filtros especiales que aseguren la retención de partículas contaminantes o infecciosas [8]. Aunado a lo anterior, las condiciones de temperatura pueden aumentar o disminuir el tiempo de latencia de infección del virus SARS-CoV-2. Por otro lado, altos niveles de CO<sub>2</sub> en espacios cerrados pueden provocar somnolencia e intoxicación, por tanto, es un riesgo para la seguridad de los pasajeros y conductores, especialmente para los conductores que pueden provocar un accidente.

En el área del confort térmico existen diferentes modelos que sirven para evaluar el confort térmico de las personas en interiores cerrados. Uno de

los modelos más utilizados es el Predicted Men Vote, en donde a través de un índice se puede inferir el nivel de confort: desconfort por frío, desconfort por frío ligero, confort, desconfort por calor ligero, desconfort por calor [9]. Este modelo requiere de la información de seis variables: temperatura del aire, velocidad del aire, temperatura media radiante, humedad relativa, actividad metabólica de la persona y aislamiento por la ropa. Otros modelos incorporan la adaptación que tiene el ser humano ante las diferentes estaciones como el usado por el ASHRAE Standard 55 [10].

En conclusión, en el SFM no existen estos estudios necesarios para brindar condiciones laborales, de uso del transporte y de su efecto en el combustible.

[4] Wang, L., Wang, Y., Ye, D., Liu, Q., 2020. Review of the 2019 novel coronavirus (SARS-CoV-2) based on current evidence. *International Journal of Antimicrobial Agents* 55, 105948. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijantimicag.2020.105948>.

[5] Kutter, J.S., Spronken, M.I., Fraaij, P.L., Fouchier, R.A., Herfst, S., 2018. Transmission routes of respiratory viruses among humans. *Current Opinion in Virology* 28, 142–151. doi:<https://doi.org/10.1016/j.coviro>.

[6] Lewis, D., 2023. Indoor air is full of flu and covid viruses. will countries clean it up? <https://www.nature.com/articles/d41586-023-00642-9>. Last checked March, 2023.

[7] Ferrari, S., Blázquez, T., Cardelli, R., Puglisi, G., Suárez, R., Mazzarella, L., 2022. Ventilation strategies to reduce airborne transmission of viruses in classrooms: A systematic review of scientific literature. *Building and Environment* 222, 109366. doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109366>.

[9] P. Fanger, *Thermal Comfort Analysis and Applications in Environmental Engineering*, Engineers McGraw-Hill, New York, 1970.

[10] R.J. De Dear, G.S. Brager, Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ashrae standard 55, *Energy Build.* 34 (2002) 549e561.

5. Propósito (Objetivo general y objetivos específicos): General

Desarrollar estrategias de ventilación en cabinas de conducción y de pasajeros que garanticen niveles adecuados de calidad de aire (bajos niveles de partículas contaminantes e infecciosas), de temperatura y humedad con fines de confort térmico.

Específicos

- Obtener resultados experimentales que ayuden a desarrollar modelos numéricos para la evaluación de diferentes estrategias de ventilación.
- Realizar un catálogo de las características de los usuarios en las 8 líneas a consolidarse en términos de sus usos y costumbres en el SFM y su confort térmico, además de los climas de las diferentes líneas.
- Generar parámetros de evaluación que vinculen la calidad de aire (en términos de partículas contaminantes e infecciosas), el confort térmico y el consumo de combustible.
- Escribir un reporte que sirva como fundamento a las reglas de operación en cabinas de conducción y de pasajeros en el SFM.

6. Estado del arte del proyecto.

No existen estudios similares en México debido a que el SFM está en reciente desarrollo y próximamente en consolidación. En el mundo existen estudios básicos de la estructura de flujo de aire en sistemas de transporte como el avión, en donde resaltan la importancia del diseño para generar una uniformidad de la temperatura y de la humedad [11,12,13]. Hay que resaltar que el avión está expuesto a temperaturas, presiones y velocidades del aire extremas comparadas con un tren. Al momento de escribir este documento solo dos estudios se encontraron en la literatura que reportan el flujo de ventilación en cabinas cerradas de pasajeros de trenes de alta velocidad mediante simulaciones numéricas de dinámica de fluidos computacional [14,15]. Estos dos trabajos coinciden en la

importancia de generar datos experimentales confiables. También exploran el efecto que tiene cada estrategia de ventilación en el consumo de combustible. Finalmente, solo dos estudios reportan la importancia del confort térmico en climas cálidos (en la India) cuando en el tren es posible abrir una ventana [16,17]. Solo el último trabajo aborda la importancia del confort de los conductores y su eficiencia en el trabajo.

[11] Thysen J.-H., van Hooff T., Blocken B., van Heijst G. (2022). PIV measurements of opposing-jet ventilation flow in a reduced-scale simplified empty airplane cabin, *European Journal of Mechanics, B/Fluids*, 94, pp. 212 – 227, 10.1016/j.euromechflu.2022.03.001. [12] Thysen J.-H., van Hooff T., Blocken B., van Heijst G. (2022). Airplane cabin mixing ventilation with time-periodic supply: Contaminant mass fluxes and ventilation efficiency, *Indoor Air*, 32 (1), art. no. e13151, 10.1111/ina.13151.

[13] Thysen J.-H., van Hooff T., Blocken B., van Heijst G.J.F. (2023). Instantaneous characteristics of interacting opposing plane jets in a generic enclosure measured with PIV, *Experiments in Fluids*, 64 (1), art. no. 19, 10.1007/s00348-022-03549-9.

[14] Panfilov I., Beskopylny A.N., Meskhi B. (2024). Improving the Fuel Economy and Energy Efficiency of Train Cab Climate Systems, Considering Air Recirculation Modes, *Energies*, 17 (9), art. no. 2224, 10.3390/en17092224.

[15] Wang T., Zheng Y., Lu Y., Shi F., Ji P., Qian B., Zhang L., Liu D., Wang J., Yang B. (2024). Reducing the contaminant dispersion and infection risks in the train cabins by adjusting the inlet turbulence intensity: A study based on turbulence simulation, *Science of the Total Environment*, 930, art. no. 172735, 10.1016/j.scitotenv.2024.172735.

[16] Mishra S.S., Gaba V.K., Netam N. (2024). Effect of air velocity and relative humidity on passengers' thermal comfort in naturally ventilated railway coach in hot-dry indian climate, *Building and Environment*, 254, art. no. 111421, 10.1016/j.buildenv.2024.111421.

[17] Yang Z., Zhou W., Xu G., Li X., Yang M., Xiao Q., Fan C., Peng Y. (2024). The analysis and optimization of thermal sensation of train drivers under occupational thermal exposure, *Frontiers in Public Health*, 11, art. no. 1164817, 10.3389/fpubh.2023.1164817

## 7. Tiempo estimado de ejecución:

El proyecto se plantea con una duración de 36 meses, dividido en 3 etapas de 12 meses cada una. En la primera etapa de 12 meses, se realizarán experimentos en al menos un vagón de tren que funcione como cabina de pasajeros y uno que funcione como cabina de conducción en los que se realizarán mediciones de velocidad y concentración de CO<sub>2</sub> con instrumentos ensamblados en la propia UPIIP. Se considera realizar experimentos con un modelo a escala de las dos cabinas (de pasajeros y de conducción) en un canal de agua abierto para realizar mediciones de campos de velocidad con mayor detalle espacial, utilizando la técnica de velocimetría por imagen de partículas. En la misma etapa se realizarían encuestas digitales en una línea de tren que se considerará como caso piloto, de preferencia el Tren Maya por la cercanía con la UPIIP, para generar una metodología que permita caracterizar a los usuarios según sus usos y costumbres en el SFM y su confort térmico en el clima de la línea seleccionada. En la segunda etapa de

12 meses, se replicaría la metodología de caracterización de los usuarios y los diferentes climas a las restantes 7 líneas. Se validarían los modelos numéricos de dinámica de fluidos computacional con software de uso libre con los datos experimentales medidos en las cabinas en tamaño real y en los modelos en laboratorio. Se buscarán o desarrollarán parámetros de evaluación que permitan seleccionar los niveles de la calidad de aire (en términos de partículas contaminantes e infecciosas), el confort térmico y el consumo de combustible adecuados. Se evaluarán diferentes estrategias de ventilación mecánica o mixta (natural y mecánica), según las características de los trenes de las 8 líneas, para promover los niveles encontrados. Finalmente, en la tercera etapa de 12 meses se realizarán talleres técnicos con las autoridades a fines al SFM y con las compañías privadas con el fin de difundir y discutir los resultados. De los talleres se escribirá un reporte que sirva como fundamento a las reglas de operación en cabinas de conducción y de pasajeros en el SFM.

## 8. Fortalezas internas para el desarrollo del proyecto:

Del grupo de trabajo de la UPIIP compuesto por 4 profesores, dos de ellos miembros del SNI, cuentan con los vínculos con el gobierno inherentes a la creación del Programa Educativo de Ingeniero Ferroviario, siendo el IPN la primera institución pública en ofrecer esta carrera y vincularse con el sector público, de gobierno y privado. Se cuentan con 4 años de experiencia, desde que se reestableció el SFM y se empezó la construcción del Tren Maya, en las diferentes áreas del SFM. El profesor responsable de la UPIIP junto con la investigadora del Instituto de Energías Renovables de la UNAM, que también es miembro del SIN, cuentan con experiencia en el estudio de transferencia de masa y energía mediante experimentos y simulaciones numéricas aplicadas a estrategias de ventilación natural, eficiencia energética y calidad de aire en espacios confinados.

La UPIIP forma parte de los participantes en las siguientes normas:

- NORMA Oficial Mexicana NOM-001-ARTF-2023, Sistema Ferroviario- Infraestructura-Durmientes Monolíticos-Especificaciones y Métodos de Prueba. DOF: 26/12/2023
- PROYECTO de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-009-ARTF-2024, Especificaciones de señales en la circulación de trenes de pasajeros. DOF: 23/05/2024
- PROYECTO de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-010-ARTF-2024, Modos de operación de los sistemas de control de tránsito de trenes de pasajeros. DOF: 02/05/2024
- PROYECTO de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-012-ARTF-2024, Disposiciones para la puesta en operación de los nuevos proyectos ferroviarios. DOF: 17/05/2024

## 9. Impacto presupuestario del proyecto.

El costo previsto para el proyecto sería de \$ 20,635,000. Los costos se dividen en equipo experimental (\$13,025,000), equipo de cómputo (\$4,400,000), en becas (\$2,664,000) y en viáticos (\$546,000).

El presupuesto para el equipo experimental y el equipo de cómputo puede venir de un convenio con la SEDENA para realizar el estudio. Los montos de las becas pueden venir de los programas sociales de becas, los programas institucionales del IPN y del CONAHCYT, o de ampliaciones presupuestales en proyectos específicos para la unidad académica. En la siguiente tabla se presentan cada uno de los costos.

Equipo experimental			Total de equipo experimental \$13,025,000		
No.	Concepto	Descripción	Cantidad	Precio [\$]	Costo [€]
1	Compra o construcción de canal de agua abierto	Sección de prueba de 0.5 m x 0.5 m x 0.5 m y una longitud de al menos 7.0 m	1	7,500,000	7,500,000
2	Compra de sistema de velocimetría de imagen de partículas estereoscópico (S-PIV)	Sistema integral de S-PIV	1	3,000,000	3,000,000
3	Manufactura de maquetas	Maquetas a escala de acrílico	30	4,000	150,000
4	Compra de material para medidores de CO2 y	Arduino con diversos aditamentos	50	3,500	175,000

5	Compra de estación meteorológica	Estación meteorológica con medición de viento, intensidad y dirección lluvia, temperatura ambiente y humedad relativa, radiación solar, radiación UV, presión atmosférica, temperatura y humedad interior	4	50,000	200,000
---	----------------------------------	---	---	--------	---------

6	Compra de anemómetros	Medición de 3 componentes de la velocidad	4	250,000	1,000,000
7	Compra de drones	Con capacidad de cámara multiespectral	4	250,000	1,000,000
<b>Equipo de cómputo</b>			<b>Total de equipo de cómputo \$4,400,000</b>		
8	Compra de un clúster de computación de alto rendimiento	Clúster con 100 núcleos y 2 TB de RAM	1	4,000,000	4,000,000
9	Compra de servidor	Servidor de almacenamiento de datos	1	200,000	200,000
10	Compra de estación de trabajo	Estación de trabajo para manejo de datos, procesamiento y manejo del clúster y del servidor	2	100,000	200,000
<b>Becas</b>			<b>Total de becas \$2,664,000</b>		
13	Alumnos de licenciatura	Beca de manutención mensual de (\$3,000) por una duración de 12 meses (\$36,000) para realizar tesis.	8	36,000	288,000
14	Alumnos de maestría	Beca de manutención mensual de (\$15,000) por una duración de 24 meses (\$360,000) para realizar tesis.	2	360,000	720,000
15	Alumno de doctorado	Beca de manutención mensual de (\$19,000) por una duración de 36 meses (\$684,000) para realizar tesis.	1	684,000	684,000
16	Posdoctorante	Beca de manutención mensual de (\$27,000) por una duración de 36 meses (\$972,000) para realizar tesis.	1	972,000	972,000

Viáticos			Total de becas \$546,000		
17	Gastos de caseta y gasolina	Uso de vehículo oficial de la UPIIP	1	400,000	400,000
18	Compra de vuelos	Vuelos al interior de la república en donde estén las 8 líneas del SFM	16	4,500	72,000
19	Compra de boletos de autobús	Conexiones menores al interior de la república	32	2,000	74,000

10. Beneficios sociales del proyecto.

México contaría con reglas de operación en el SFM que estén fundamentadas en un estudio científico que garantice el mejoramiento de niveles adecuados de calidad de aire (bajos niveles de partículas contaminantes e infecciosas), de temperatura y humedad con fines de confort térmico, para usuarios y trabajadores. Además, la implementación de estas reglas de operación disminuirá el consumo de combustible, efecto que también sería explorado en este estudio. Por lo tanto, pondría al SFM a la vanguardia en el campo de la sustentabilidad y servicio de trenes.

11. Impacto regulatorio.

El SFM está en reciente desarrollo y próximamente en consolidación, por lo que los resultados de este estudio pueden convertirse directamente en manuales, reglas de operación, normas y reglamentos de diseño y construcción de sistemas de ventilación. La UPIIP ya ha participado en 4 normas o proyectos de normas oficiales en el SFM.

12. Definir acciones para la ejecución inmediata del proyecto.

Como se mencionó en el apartado anterior, el SFM está en reciente desarrollo y próximamente en consolidación, por lo que los resultados de este estudio pueden convertirse directamente en manuales, reglas

de operación, normas y reglamentos de diseño y construcción de sistemas de ventilación.